豆粕替代鱼粉饲料中添加胆固醇和牛磺酸对凡纳滨对虾生长性能、肝胰腺和血清胆固醇含量及体成分的影响

骆 源 宋 凯 张春晓* 王 玲 黄 飞

(集美大学水产学院饲料检测与安全评价重点实验室，农业部东海海水健康养殖重点实验室，厦门 361021)

摘 要：本试验旨在探讨豆粕替代鱼粉饲料中添加胆固醇和牛磺酸对凡纳滨对虾生长性能、肝胰腺和血清胆固醇含量及体成分的影响。配制 6 种等氮等能的试验饲料，1 种为含 30%鱼粉的高鱼粉饲料（FM 组），另外 5 种为含 12%鱼粉的低鱼粉高豆粕饲料（SBM1～5 组），其中 SBM1 组不添加胆固醇和牛磺酸，SBM2 和 SBM3 组分别添加 0.3%和 0.6%的胆固醇，SBM4 组添加 0.3%的胆固醇和 0.2%的牛磺酸，SBM5 组添加 0.6%的胆固醇和 0.2%的牛磺酸。将初始体重为（0.35±0.01） g 的凡纳滨对虾幼虾 540 尾随机分成 6 组，每组 3 个重复，每个重复 30 尾虾，进行为期 8 周的生长试验。结果表明：FM、SBM3、SBM4 和 SBM5 组对虾的增重率（WGR）、特定生长率（SGR）和成活率（SR）显著高于 SBM1 组（$P<0.05$），饲料系数（FCR）显著低于 SBM1 组（$P<0.05$），其中以 FM 组对虾的 WGR、SGR 和 SR 最高，且 FCR 最低，但与 SBM3、SBM4 和 SBM5 组无显著差异（$P>0.05$）。SBM3、SBM4 和 SBM5 组对虾的血清和肝胰腺总胆固醇（TC）含量显著高于 SBM1 组（$P<0.05$），但与 FM 组差异不显著（$P>0.05$）。此外，SBM1 组对虾的血清低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）含量显著低于 FM、SBM2、SBM3、SBM4 和 SBM5 组（$P<0.05$），血清高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）含量显著低于 SBM3 和 SBM5 组（$P<0.05$）。对虾全虾水分和粗灰分含量各组间无显著差异（$P>0.05$）。SBM1 组对虾全虾粗蛋白质和粗脂肪含量显著低于 FM 组、SBM3 和 SBM5 组（$P<0.05$），与 SBM2 和 SBM4 组相比无显著差异（$P>0.05$）。根据本试验结果得出，低鱼粉高豆粕饲料中添加 0.6%胆固醇或同时添加 0.3%胆固醇和 0.2%牛磺酸能够有效地提高凡纳滨对虾的生长性能和饲料效率。

关键词：豆粕；胆固醇；牛磺酸；生长性能；凡纳滨对虾

中图分类号：S963　　文献标识码：A　　文章编号：

凡纳滨对虾（*Litopenaeus vannamei*）俗称南美白对虾，是当今世界养殖虾类产量最高的三大品种之一[1]。鱼粉作为传统的优质饲料蛋白质源已在水产动物配合饲料中得到广泛使用[2]，在水产动物饲料配方中除了提供蛋白质和必需氨基酸外，还提供丰富的其他必需营养物质，如必需脂肪酸、维生素、矿物质、

收稿日期：2015-12-18

基金项目：国家公益性行业(农业)专项(201303053)

作者简介：骆 源（1988-），男，河南商丘人，硕士研究生，研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: luoyuan2009@126.com

*通信作者：张春晓，副教授，硕士生导师，E-mail: cxzhang@jmu.edu.cn

胆固醇、牛磺酸和核苷酸等[3-4]。随着水产养殖业的快速发展，鱼粉的消耗量不断增加，然而世界鱼粉供应总量却停滞不前，不可避免地出现鱼粉价格升高，进而导致饲料价格居高不下，因此寻找鱼粉替代蛋白质源成为节约养殖成本的关键[5]。研究表明，使用来源广泛的植物蛋白质源替代鱼粉是可行的[6]。但是，需要特别指出的是植物蛋白质源替代鱼粉后，某些必需营养物质的含量不足限制了其替代鱼粉的效果，如胆固醇和牛磺酸等。

胆固醇是虾蟹类生长所必需的营养素，是机体合成蜕皮激素的前体物[7-8]，尽管甲壳类动物组织中存在大量固醇类物质，但它们自身缺乏合成固醇类物质的能力[9]。已有研究报道饲料中补充胆固醇可维持甲壳动物正常的生长、发育和存活，当饲料中缺乏胆固醇时会引起甲壳类动物蜕壳死亡综合征的发生[10-12]。鱼粉中胆固醇的含量较植物性蛋白质原料高，有研究发现高植物性蛋白质源饲料中补充适量的胆固醇可提高水生动物的生长和成活率[4]。牛磺酸是一种氨基酸的衍生物，可从牛胆汁中分离获得[13]，在哺乳动物和鱼类中，研究者发现了牛磺酸的重要生理功能，包括组成细胞膜、抗氧化解毒、渗透压调节[14-15]等。水生动物虽然能够合成部分牛磺酸，但不能够满足其生长需要，同时大多数植物蛋白质中都缺乏牛磺酸[16]。可见，植物性蛋白质源中胆固醇和牛磺酸的缺乏可能是限制其替代鱼粉效果的关键因素之一。然而，目前有关高植物性蛋白质饲料中添加胆固醇或牛磺酸对凡纳滨对虾饲养效果的研究鲜有报道。因此，本研究旨在探讨豆粕替代鱼粉饲料中单独添加胆固醇或同时添加胆固醇和牛磺酸对凡纳滨对虾生长性能、肝胰脏和血清胆固醇含量及体成分的影响，以期为凡纳滨对虾低鱼粉饲料的配制提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

以鱼粉、豆粕和谷朊粉为蛋白质源，鱼油、大豆油和大豆卵磷脂为脂肪源，配制 6 种等氮等能的试验饲料，其组成及营养水平见表 1。6 种试验饲料中，1 种为含 30%鱼粉的高鱼粉饲料（FM 组），另 5 种为低鱼粉高豆粕饲料（SBM1～5 组），以豆粕替代高鱼粉饲料中 60%的鱼粉，其中 SBM1 组不添加胆固醇和牛磺酸，SBM2 和 SBM3 组分别添加 0.3%和 0.6%的胆固醇，SBM4 组添加 0.3%的胆固醇和 0.2%的牛磺酸，SBM5 组添加 0.6%的胆固醇和 0.2%的牛磺酸。将饲料原料进行粉碎后，过 80 目筛网，按饲料配方的比例逐级扩大均匀混合，然后加油加水，经双螺杆制粒机（CD4×1TS 型多功能催化成型机，华南理工大学研制）制成粒径为 1.0 mm 的颗粒饲料，饲料风干后置于-20 ℃冰箱保存备用。

表 1 试验饲料组成及营养水平（干物质基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (DM basis) %

项目 Items	组别 Groups

	FM	SBM1	SBM2	SBM3	SBM4	SBM5
原料 Ingredients						
鱼粉 Fish meal	30.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
豆粕 Soybean meal	25.00	52.00	52.00	52.00	52.00	52.00
谷朊粉 Wheat gluten meal	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
微晶纤维素 Crystalline cellulose	1.97					
α-淀粉 α-starch	29.85	18.77	18.77	18.77	18.57	18.57
鱼油 Fish oil	1.50	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
大豆油 Soybean oil	1.60	1.20	0.90	0.60	0.90	0.60
大豆卵磷脂 Soybean lecithin	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
氯化胆碱 Choline chloride	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
矿物质预混物 Mineral premix[1)]	0.78	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23
维生素预混物 Vitamin premix[2)]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
氨基酸混合物 Amino acid mixture[3)]	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
维生素 C Vitamin C	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
防霉剂 Mold inhibitor	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
酵母水解物 Yeast hydrolyzate	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
褐藻酸钠 Sodium alginate	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
抗氧化剂 Antioxidant	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
胆固醇 Cholesterol[4)]			0.30	0.60	0.30	0.60
牛磺酸 Taurine[5)]					0.20	0.20
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels						
粗蛋白质 Crude protein	38.12	38.78	38.62	38.53	38.29	38.70
粗脂肪 Crude lipid	7.65	7.21	7.19	7.51	7.28	7.33
粗灰分 Ash	6.89	8.01	7.98	8.00	8.11	8.09
总胆固醇 Total cholesterol	0.24	0.18	0.46	0.76	0.47	0.77
牛磺酸 Taurine	0.15	0.04	0.04	0.04	0.24	0.24

1) FM 组矿物质预混料为每千克饲料提供 Mineral premix of FM group provided the following per kg of diets：甘氨酸镁 Mg-Gly 7.31 g，蛋氨酸锰 Mn-Met 0.366 g，蛋氨酸铜 Cu-Met 0.138 g。SBM 组矿物质预混料为每千克饲料提供 Mineral premix of SBM groups provided the following per kg of diets：甘氨酸镁 Mg-Gly 4.85 g，蛋氨酸锰 Mn-Met 0.366 g，蛋氨酸铜 Cu-Met 0.138 g，蛋氨酸铁 Fe-Met 1.09 g，$CaCl_2$ 9.79 g，$Ca(H_2PO_4)$ 10.78 g，NaCl 5.45 g。

2) 维生素预混料为每千克饲料提供 Vitamin premix provided the following per kg of diets：VA 10 mg，VD 10 mg，VC 1 000 mg，VK 40 mg，VE 500 mg，VB_1 60 mg，VB_2 70 mg，VB_6 80 mg，VB_{12} 0.4 mg，烟酸 nicotinic acid 200 mg，泛酸钙 calcium pantothenate 200 mg，生物素 biotin 2 mg，肌醇 inositol 500 mg，叶酸 folic acid 8 mg，微晶纤维素 crystalline cellulose 17 229.6 mg。

3)氨基酸混合物为每千克饲料提供 Amino acid mixture provided the following per kg of diets：蛋氨酸 Met 2.81 g，组氨酸 His 0.107 g，赖氨酸 Lys 0.110 g，甘氨酸 Gly 0.779 g，丙氨酸 Ala 1.23 g。

4) 由上海捷瑞生物工程有限公司提供(等级：超纯级)Obtained from Geneary Biotech Co., Ltd., *Shanghai*, China (grade: ultra purity)。

5) 由北京惠康源生物科技有限公司提供(纯度:99%)Obtained from *Huikangyuan* Biotech Co., Ltd., *Beijing*, China (purity: 99%)。

1.2 试验动物与饲养管理

试验所用凡纳滨对虾虾苗购于福建省厦门市海沧区育苗场，为人工孵化的同一批虾苗，虾苗运至集美大学养殖基地进行驯化，以适应试验饲料和养殖环境。选用 540 尾表观正常、体质健壮以及规格均匀的幼虾，初始均重为（0.35±0.01） g，用 10 mg/L 聚维酮碘药浴 10 min 后，随机分配到循环试验系统的 18 个圆形试验桶（150 L）中。每桶放养凡纳滨对虾 30 尾，共 6 个试验组，每组 3 个重复，养殖周期为 8 周。水源为经紫外消毒、沙滤的天然海水，每天分别在 08:00、14:00 和 20:00 定时投喂饲料，按幼虾体重的 6%~10%投喂。为了减少饲料营养物质在水中的溶失，每个时间点的饲料分 3~4 轮投喂，直到对虾达表观饱食为止，收集未食完的饲料用于计算摄食量，吸污后换水，换水量占总水量的 1/3。养殖期间，采用自然光照（光照和黑暗时间比为 12 h:12 h）。试验期间水温 22~24 ℃，盐度 26~28，氨氮含量低于 0.2 mg/L，溶氧含量大于 6.5 mg/L，pH 8.0~8.2，亚硝酸盐含量低于 0.02 mg/L，每天观察并记录对虾的摄食、蜕壳及死亡情况。

1.3 样品采集

养殖试验结束后，对虾禁食 24 h，分别称取每桶对虾总重并记录尾数。从每桶随机取 10 尾虾，合并

称重，绞碎，于 70 ℃烘箱中烘 6 h，然后 105 ℃烘至恒重，粉碎后的全虾样品装入密封袋中于-20 ℃冰箱中保存，用于体成分分析。另从每桶随机取 8 尾虾，用 1 mL 无菌注射器从对虾围心腔处采集血淋巴，于 4 ℃冰箱静置 12 h，然后以 3 500 r/min 在 4 ℃下离心 10 min[17]，收集血清，保存于-80 ℃冰箱待测。将经采血的对虾解剖，剥离出肝胰腺，于-80 ℃冰箱保存，用于生化指标分析。

1.4 测定方法

常规营养成分测定：饲料常规营养成分测定采用 AOAC（2005）[18]的测定方法。水分含量测定采用 105 ℃常压烘箱干燥法；粗蛋白质含量测定采用凯氏定氮法（氮×6.25），测定仪器为全自动凯氏定氮仪（FOSS Kjeltec8400，瑞士）；粗脂肪含量测定采用索氏抽提法（提取溶剂为乙醚）；粗灰分含量测定为采用马福炉 550 ℃灼烧法。

运用比色酶法检测饲料和肝胰腺中总胆固醇（total cholesterol,TC）含量。总胆固醇含量测定方法：取饲料或肝胰腺约 500 mg，按 1:9（质量体积比）加入氯仿与甲醇混合抽提液（氯仿:甲醇=2:1，体积比）抽提 24 h，4 000×*g* 离心 5 min，取上清液（脂溶液）0.5 mL，高纯氮气吹干后得到的沉淀物用 1 mL 异丙醇（含 100 g/L Triton X-100）进行再溶解[19]。所得样品使用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒（编号 A111-1）进行测定。

饲料中牛磺酸含量的测定参照文献［20］的方法，即：在饲料样品中加入 4%磺基水杨酸，超声波仪超声匀质，15 000 r/min 下离心，取上清液加入 0.002 mol/L 的盐酸定容后经 0.45 μm 滤膜过滤，滤液用日立 L-8900 氨基酸分析仪检测。

血清生化指标测定：总胆固醇采用铜试剂法测定，高密度脂蛋白胆固醇（high density lipoprotein cholesterol,HDL-C）和低密度脂蛋白胆固醇（low density lipoprotein cholesterol,LDL-C）均采用双试剂直接法测定，测定试剂盒由南京建成生物工程研究所提供，具体操作步骤见说明书。

1.5 计算公式

养殖试验结束后，根据记录的相应数据，按照下式计算各生长指标。

增重率（weight gain rate,WGR,%）$=100\times(W_t-W_0)/W_0$；

特定生长率（specific growth rate,SGR,%/d）$=100\times(\ln W_t-\ln W_0)/t$；

饲料系数（feed conversion ratio,FCR）$=FC/(W_t-W_0)$；

成活率（survival rate,SR,%）$=100\times N_f/N_i$。

式中：W_0 为初始均体重（initial average body weight,IBW），g/尾；W_t 为终末均重（final average body weight,FBW），g/尾；t 为饲喂天数，d；FC 为平均每尾虾摄食饲料总量（干重），g；N_i 为初始虾尾数，尾；N_f 为终末虾尾数，尾。

1.6 数据处理和分析

试验数据经 Excel 2010 初步整理后，采用 SPSS 19.0 统计软件进行单因素方差分析（one-way ANOVA）和双因素方差分析（two-way ANOVA）。若组间存在显著差异(P＜0.05)，则采用 Student-Newman-Keuls 法进行多重比较分析。试验数据均以平均值±标准误（mean±SE）的形式表示。

2 结 果

2.1 豆粕替代鱼粉饲料中添加胆固醇和牛磺酸对凡纳滨对虾生长性能的影响

由表 2 可知，SBM1 组凡纳滨对虾的 WGR、SGR 和 SR 均显著低于 FM 组、SBM3、SBM4 和 SBM5 组（P<0.05），但与 SBM2 组相比无显著性差异（P>0.05）；同时，SBM1 组凡纳滨对虾的饲料系数（FCR）显著高于 FM 组、SBM3、SBM4 和 SBM5 组（P<0.05），但与 SBM2 组相比差异不显著（P>0.05）。在豆粕替代鱼粉饲料中补充添加 0.3%的胆固醇后凡纳滨对虾的各生长指标均未发生显著变化（P>0.05），而添加补充 0.6%的胆固醇后凡纳滨对虾的 WGR、SGR 和 SR 显著升高（P<0.05），FCR 显著降低（P<0.05）。与单独添加 0.3%的胆固醇相比，同时添加 0.3%的胆固醇和 0.2%的牛磺酸可显著提高凡纳滨对虾的 WGR、SGR 和 SR（P<0.05）；与单独添加 0.6%的胆固醇相比，同时添加 0.6%的胆固醇和 0.2%的牛磺酸后凡纳滨对虾的各生长指标均无显著变化(P>0.05)。在添加 0.3%和 0.6%胆固醇的饲料中添加牛磺酸对凡纳滨对虾的各生长指标均无显著影响（P>0.05）。在豆粕替代鱼粉饲料中添加胆固醇和牛磺酸对凡纳滨对虾的 FCR 和 SR 均无显著的交互作用（P>0.05），但对凡纳滨对虾的 FBW、WGR 和 SGR 存在显著的交互作用（P<0.05）。

表 2 各组凡纳滨对虾的生长性能

Table 2 Growth performance of *Litopenaeus vannamei* for each group

组别 Groups	初始均重 IBW/g	终末均重 FBW/g	增重率 WGR/%	特定生长率 SGR/(%/d)	饲料系数 FCR	成活率 SR/%
FM	0.35±0.01	2.03±0.08^{b}	468.86±9.43^{b}	3.14±0.04^{b}	1.29±0.02^{a}	80.00±1.92^{b}
SBM1	0.35±0.01	1.62±0.04^{a}	362.54±12.08^{a}	2.73±0.03^{a}	1.52±0.04^{c}	61.11±2.22^{a}
SBM2	0.35±0.01	1.65±0.04^{a}	371.00±10.31^{a}	2.77±0.04^{a}	1.44±0.07^{bc}	67.78±1.11^{a}
SBM3	0.35±0.01	1.99±0.03^{b}	467.62±16.16^{b}	3.10±0.03^{b}	1.37±0.07^{ab}	76.67±3.33^{b}
SBM4	0.35±0.01	1.93±0.11^{b}	452.83±31.17^{b}	3.05±0.06^{b}	1.35±0.03^{ab}	75.56±2.22^{b}
SBM5	0.35±0.01	1.97±0.11^{b}	463.37±19.18^{b}	3.09±0.04^{b}	1.38±0.06^{ab}	75.00±1.67^{b}
P 值 *P*-value						
胆固醇水平 Cholesterol level		<0.01	<0.01	<0.01	0.627	0.521

（C）					
牛磺酸水平 Taurine level （T）	0.012	0.012	<0.01	0.240	0.156
C×T	0.012	0.012	0.016	0.183	0.156

同列数据肩标不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05）。

Values in the same column with different small letter superscripts indicated significant difference (*P*<0.05).

2.2 豆粕替代鱼粉饲料中添加胆固醇和牛磺酸对凡纳滨对虾肝胰腺和血清胆固醇含量的影响

由表 3 可知，SBM1 组凡纳滨对虾的血清和肝胰腺总胆固醇含量均显著低于 FM、SBM3、SBM4 和 SBM5 组（*P*<0.05），与 SBM2 组无显著差异（*P*>0.05）。在豆粕替代鱼粉饲料中，随着胆固醇添加水平的升高，血清和肝胰腺中总胆固醇含量均呈现上升的趋势，而单独添加 0.6%胆固醇的 SBM3 组与同时添加 0.6%胆固醇和 0.2%牛磺酸的 SBM5 组无显著差异（*P*>0.05）。SBM1 组凡纳滨对虾的血清低密度脂蛋白胆固醇含量显著低于 FM、SBM2、SBM3、SBM4 和 SBM5 组（*P*<0.05）；同时，SBM1 组凡纳滨对虾的血清高密度脂蛋白胆固醇含量显著低于 SBM3 和 SBM5 组（*P*<0.05），与其他各组相比差异不显著（*P*>0.05）。

表 3 各组凡纳滨对虾的肝胰腺和血清胆固醇含量

Table 3 Cholesterol content in hepatopancreas and serum of *Litopenaeus vannamei* for each group

项目 Items	组别 Groups					
	FM	SBM1	SBM2	SBM3	SBM4	SBM5
肝胰腺总胆固醇 hepatopancreas TC/(g/kg)	0.40±0.01[b]	0.20±0.03[a]	0.30±0.01[a]	0.42±0.00[b]	0.31±0.02[a]	0.39±0.01[b]
血清总胆固醇 Serum TC/(mmol/L)	1.03±0.03[b]	0.62±0.02[a]	0.85±0.11[ab]	1.11±0.14[b]	0.95±0.05[b]	1.14±0.02[b]
血清低密度脂蛋白胆固醇 Serum LDL-C/(mmol/L)	0.75±0.01[c]	0.12±0.05[a]	0.61±0.03[b]	0.71±0.01[c]	0.71±0.04[c]	0.87±0.02[d]
血清高密度脂蛋白胆固醇 Serum HDL-C/(mmol/L)	0.10±0.01[a]	0.08±0.00[a]	0.11±0.02[a]	0.17±0.01[b]	0.13±0.02[ab]	0.16±0.00[b]

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05）。表 4 同。

Values in the same row with different small letter superscripts indicated significant difference (P<0.05). The same as Table 4.

2.3 豆粕替代鱼粉饲料中添加胆固醇和牛磺酸对凡纳滨对虾体成分的影响

由表 4 可知，在豆粕替代鱼粉饲料中单独添加胆固醇或同时添加胆固醇和牛磺酸对凡纳滨对虾全虾水分和粗灰分含量均无显著影响（P>0.05）。在豆粕替代鱼粉饲料中，随着胆固醇添加水平的升高，全虾粗蛋白质和粗脂肪含量呈上升趋势，SBM1 组全虾粗蛋白质和粗脂肪含量显著低于 FM、SBM3 和 SBM5 组（P<0.05），与 SBM2 和 SBM4 组相比无显著差异（P>0.05）。

表 4 各组凡纳滨对虾的体成分

Table 4 Body composition of *Litopenaeus vannamei* for each group %

项目 Items	组别 Groups					
	FM	SBM1	SBM2	SBM3	SBM4	SBM5
水分 Moisture	77.37±0.45	79.10±0.57	78.98±1.02	77.74±0.18	79.10±0.09	78.22±1.04
粗蛋白质 Crude protein	15.94±0.06^{b}	14.83±0.06^{a}	15.10±0.15^{a}	15.79±0.12^{ab}	14.91±0.15^{a}	15.64±0.22^{ab}
粗脂肪 Crude lipid	0.94±0.04^{bc}	0.82±0.03^{a}	0.87±0.05^{ab}	0.97±0.04^{c}	0.90±0.02^{abc}	0.95±0.02^{c}
粗灰分 Ash	3.69±0.09	3.43±0.10	3.41±0.19	3.58±0.01	3.35±0.03	3.61±0.13

3 讨 论

胆固醇是甲壳动物合成性激素、肾上腺皮质激素、蜕壳激素和维生素 D 的前体物质，也是其维持良好生长性能以及存活所必需的营养物质[21]。虾蟹等甲壳动物自身缺乏合成胆固醇的能力，因此必须依靠外源饲料供应，饲料中胆固醇含量不足会影响甲壳类动物的生长、发育和存活[22]。与鱼粉相比，大部分植物性蛋白质源胆固醇含量都很低[23]，本试验的结果也发现植物性蛋白质源高比例替代饲料鱼粉后显著降低了饲料中胆固醇的含量，且胆固醇的不足会严重影响凡纳滨对虾的生长和存活。饲料胆固醇含量与甲壳类动物的 SR 直接相关。D’Abramo 等[24]研究表明小龙虾饲喂不含固醇类物质的饲料时出现了严重的退壳死亡综合征；罗氏沼虾[10]、日本囊对虾[25]和斑节对虾[26]摄食不含胆固醇的饲料显著降低了其生长和 SR；Paibulkichakul 等[21]发现饲喂添加 1%胆固醇的饲料可显著提高斑节对虾的 SR；Duerr 等[27]在饲料中添加不同水平的胆固醇显著提高了凡纳滨对虾的 SR。本试验结果显示，在豆粕替代鱼粉饲料中添加 0.6%的胆固醇显著提高了凡纳滨对虾的 WGR、SGR 和 SR，说明高比例植物性蛋白质替代鱼粉饲料中需要补充一定量胆固醇才能维持凡纳滨对虾的正常生长发育和存活。

在本试验中，高比例豆粕替代鱼粉饲料中在添加 0.3%胆固醇的基础上再添加 0.2%牛磺酸显著提高了凡纳滨对虾的 WGR、SGR 和 SR，同时还降低了 FCR。研究发现，在以鱼粉、鱿鱼粉和虾粉作为蛋白质源的饲料中添加牛磺酸对斑节对虾的生长无显著影响[28]，而在以酪蛋白为蛋白质源的饲料中添加牛磺酸则显著提高了斑节对虾的 WGR、饲料转化率和蛋白质效率。这可能与以酪蛋白为蛋白质源的试验饲料中牛磺酸含量不能够满足斑节对虾生长需要有关。研究表明，每 100 g 鱼粉干物质中含牛磺酸 0.5~0.7 g，而植物性蛋白质源几乎不含牛磺酸[29]，因此，当豆粕高比例替代鱼粉后，会导致饲料中牛磺酸含量下降。本试验结果也说明高比例豆粕替代鱼粉导致饲料中的牛磺酸不能够满足凡纳滨对虾生长的需要，建议在含高比例植物蛋白质的凡纳滨对虾饲料中补充一定量的牛磺酸。同时，本试验还发现 SBM2 组的 WGR 和 SR 显著低于 SBM3、SBM4 和 SBM5 组，说明在豆粕替代 60%鱼粉的饲料中添加 0.3%的胆固醇并不能满足对虾生长的需要，而在此基础上补充 0.2%的牛磺酸促进了对虾对胆固醇的利用率，具有节约胆固醇的效应。这可能是由于甲壳类动物肝胰腺能够合成牛磺酸，并释放到肠道中溶解胆固醇，促进胆固醇的消化吸收[30]。有研究表明牛磺酸是寄居蟹胃液中乳化剂的组成部分，参与胆固醇的消化和吸收[31]。Shiau 等[28]研究也发现，牛磺酸通过影响斑节对虾胆固醇的消化吸收，进而影响其对胆固醇的需要量。本试验中，胆固醇和牛磺酸对凡纳滨对虾的 WGR 和 SGR 表现出显著的交互作用，这种协同促生长效应可能是通过牛磺酸促进胆固醇的消化吸收实现的。

本试验使用豆粕替代 60%鱼粉后，添加 0.3%和 0.6%的胆固醇饲喂凡纳滨对虾，结果表明，随着饲料中胆固醇添加水平的升高，凡纳滨对虾血清中总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇含量呈上升的趋势，特别是显著增加了血清低密度脂蛋白胆固醇含量，但与饲喂鱼粉饲料的凡纳滨对虾无显著差异。研究表明，摄食以豆粕、谷朊粉、大豆浓缩蛋白等植物性蛋白质源为主要蛋白质源的饲料时，大菱鲆[32]、金头鲷[33]、鹦鹉鱼等鱼类[34]血浆胆固醇含量显著低于摄食以鱼粉为主要蛋白质源的饲料，而补充胆固醇后可提高其血浆胆固醇含量。陈京华[35]对牙鲆的研究发现，血浆总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇含量与饲料中胆固醇含量呈显著相关关系。虽然饲料中植物性蛋白质源替代鱼粉降低血浆胆固醇含量的作用机制目前尚不清楚，但由于甲壳类动物不能自身合成胆固醇，因此推测植物性蛋白质源中缺少胆固醇可能是凡纳滨对虾血清胆固醇含量低的主要原因。

本试验结果表明，在豆粕替代鱼粉饲料中添加胆固醇显著提高了凡纳滨对虾全虾粗脂肪含量，并随着胆固醇添加水平的升高而增加。Thongrod 等[36]报道饲料中添加胆固醇可显著提高墨吉对虾体内粗脂肪含量，Gong 等[37]也发现饲料中添加胆固醇能够增加凡纳滨对虾和日本囊对虾体内脂肪的储存量。上述结果说明高植物蛋白质饲料中补充适量的胆固醇可能提高了对虾对脂肪的利用率，进而提高了虾体脂肪的储存

量。

4 结 论

本试验中，在豆粕替代鱼粉饲料中单独添加 0.6%胆固醇或同时添加 0.3%胆固醇和 0.2%牛磺酸能够有效地提高凡纳滨对虾的生长性能和饲料效率，且胆固醇和牛磺酸对凡纳滨对虾具有显著的协同促生长效应。

参考文献：

[1] 中国农业部.2005 中国渔业年鉴[M].北京:海洋出版社,2005.

[2] TACON A G J,METIAN M.Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds:trends and future prospects[J].Aquaculture,2008,285(1/2/3/4):146–158.

[3] TAKAGI S,MURATA H,GOTO T,et al.Taurine is an essential nutrient for yellowtail *Seriola quinqueradiata* fed non-fish meal diets based on soy protein concentrate[J].Aquaculture,2008,280(1/2/3/4):198–205.

[4] CHENG Z J,HARDY R W.Protein and lipid sources affect cholesterol concentrations of juvenile Pacific white shrimp,*Litopenaeus vannamei* (Boone)[J].Journal of Animal Science,2004,82(4):1136–1145.

[5] TAN R K H,DOMINY W G.Commercial pelleting of crustacean feeds[M]//D'ABRAMO L R,CONKLIN D E,AKIYAMA D M.Advances in World Aquaculture.Volume 6,Crustacean Nutrition.US:World Aquaculture Society,1997:520–549.

[6] MORRIS T C,SAMOCHA T M,DAVIS D A,et al.Cholesterol supplements for *Litopenaeus vannamei* reared on plant based diets in the presence of natural productivity[J].Aquaculture,2011,314(1/2/3/4):140–144.

[7] HOLME M H,ZENG C S,SOUTHGATE P C.The effects of supplemental dietary cholesterol on growth,development and survival of mud crab,*Scylla serrata*,megalopa fed semi-purified diets[J].Aquaculture,2006,261(4):1328–1334.

[8] TESHIMA S.Phospholipids and sterols[M]//D'ABRAMO L R,CONKLIN D E,AKIYAMA D M.Crustacean nutrition.Baton Rouge:World Aquaculture Society,1997.

[9] TESHIMA S I,KANAZAWA A.Biosynthesis of sterols in the lobster,*Panulirus japonica*,the prawn,*Penaeus japonicus*,and the crab,*Portunus trituberculatus*[J].Comparative Biochemistry and Physiology Part B:Comparative Biochemistry,1971,38(3):597–602.

[10] BRIGGS M R P,JAUNCEY K,BROWN J H.The cholesterol and lecithin requirements of juvenile prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) fed semi-purified diets[J].Aquaculture,1988,70(1/2):121–129.

[11] SHUDO K,NAKAMURA K,ISHIKAWA S,et al.Studies on formula feed for Kuruma prawn Ⅳ.On the growth-promoting effects of both squid liver oil and cholesterol[J].Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries,1971,65:129–137.

[12] CONKLIN D E,D'ABRAMO L R,BORDNER C E,et al.A successful purified diet for the culture of juvenile lobsters:the effect of lecithin[J].Aquaculture,1980,21(3):243–249.

[13] PARK T,LEE K.Dietary taurine supplementation reduces plasma and liver cholesterol and triglyceride levels in rats fed a high-cholesterol or a cholesterol-free diet[M]//SCHAFFER S,LOMBARDINI J B,HUXTABLE R J.Taurine 3:cellular and regulatory mechanisms.New York:Springer,1998:319–325.

[14] WRIGHT C E,TALLAN H H,LIN Y Y,et al.Taurine:biological update[J].Annual Review of Biochemistry,1986,55:427–453.

[15] THURSTON J H,HAUHART R E,DIRGO J A.Taurine:a role in osmotic regulation of mammalian brain and possible clinical significance[J].Life Sciences,1980,26(19):1561–1568.

[16] YAMAMOTO T,AKIMOTO A,KISHI S,et al.Apparent and true availabilities of amino acids from several protein sources for fingerling rainbow trout,common carp,and red sea bream[J].Fisheries Science,1998,64(3):448–458.

[17] CHENG K M,HU C Q,LIU Y N,et al.Dietary magnesium requirement and physiological responses of marine shrimp *Litopenaeus vannamei* reared in low salinity water[J].Aquaculture Nutrition,2005,11(5):385–393.

[18] AOAC.Official methods of analysis of AOAC international[S].18th ed.Gaithersburg,MD,:Association of Official Analytical Chemists International,2005.

[19] 贠彪.在高植物蛋白饲料中添加胆固醇、牛磺酸和大豆皂甙对大菱鲆生长性能和胆固醇代谢的影响[D].博士学位论文.青岛:中国海洋大学,2012.

[20] 周铭文,王和伟,叶继丹.饲料牛磺酸对尼罗罗非鱼生长、体成分及组织游离氨基酸含量的影响[J].水产学报,2015,39(2):213–223.

[21] PAIBULKICHAKUL C,PIYATIRATITIVORAKUL S,KITTAKOOP P,et al.Optimal dietary levels of lecithin and cholesterol for black tiger prawn *Penaeus monodon* larvae and postlarvae[J].Aquaculture,1998,167(3/4):273–281.

[22] HARRISON K E.The role of nutrition in maturation,reproduction and embryonic development of decapod crustaceans:a review[J].Journal of Shellfish Research,1990,9(1):1–28.

[23] DENG J,MAI K,AI Q,et al.Interactive effects of dietary cholesterol and protein sources on growth performance and cholesterol metabolism of Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J].Aquaculture Nutrition,2010,16(4):419–429.

[24] D'ABRAMO L R,WRIGHT J S,WRIGHT K H,et al.Sterol requirement of cultured juvenile crayfish,*Pacifastacus leniusculus*[J].Aquaculture,1985,49(3/4):245–255.

[25] TESHIMA S I,KANAZAWA A,SASADA H.Nutritional value of dietary cholesterol and other sterols to larval prawn,*Penaeus japonicus* Bate[J].Aquaculture,1983,31(2/3/4):159–167.

[26] SHEEN S S,LIU P C,CHEN S N,et al.Cholesterol requirement of juvenile tiger shrimp (*Penaeus monodon*)[J].Aquaculture,1994,125(1/2):131–137.

[27] DUERR E O,WALSH W A.Evaluation of cholesterol additions to a soyabean meal-based diet for juvenile Pacific white shrimp,*Penaeus vannamei* (Boone),in an outdoor growth trial[J].Aquaculture Nutrition,1996,2(2):111–116.

[28] SHIAU S Y,CHOU B S.Grass shrimp,*Penaeus monodon*,growth as influenced by dietary taurine supplementation[J].Comparative Biochemistry and Physiology Part A:Physiology,1994,108(1):137–142.

[29] YAMAMOTO T,SUZUKI N,FURUITA H,et al.Supplemental effect of bile salts to soybean meal-based diet on growth and feed utilization of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*[J].Fisheries Science,2007,73(1):123–131.

[30] VAN DEN OORD A,DANIELSSON H,RYHAGE R.On the structure of the emulsifiers in gastric juice from the crab,*Cancer pagurus L*[J].Journal of Biological Chemistry,1965,240:2242–2247.

[31] LESTER R,CAREY M C,LITTLE J M,et al.Crustacean intestinal detergent promotes sterol solubilization[J].Science,1975,189(4208):1098–1100.

[32] REGOST C,ARZEL J,KAUSHIK S J.Partial or total replacement of fish meal by corn gluten meal in diet for turbot (*Psetta maxima*)[J].Aquaculture,1999,180(1/2):99–117.

[33] VENOU B,ALEXIS M N,FOUNTOULAKI E,et al.Effects of extrusion and inclusion level of soybean meal on diet digestibility,performance and nutrient utilization of gilthead sea bream (*Sparus aurata*)[J].Aquaculture,2006,261(1):343–356.

[34] LIM S J,LEE K J.Partial replacement of fish meal by cottonseed meal and soybean meal with iron and phytase supplementation for parrot fish *Oplegnathus fasciatus*[J].Aquaculture,2009,290(3/4):283–289.

[35] 陈京华.微生物发酵、外源酶制剂和促摄食物质对牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)利用豆粕蛋白的影响[D].

博士学位论文.青岛:中国海洋大学,2006.

[36] THONGROD S,BOONYARATPALIN M.Cholesterol and lecithin requirement of juvenile banana shrimp,*Penaeus merguiensis*[J].Aquaculture,1998,161(1/2/3/4):315–321.

[37] GONG H,LAWRENCE A L,JIANG D H,et al.Lipid nutrition of juvenile *Litopenaeus vannamei*: Ⅰ.Dietary cholesterol and de-oiled soy lecithin requirements and their interaction[J].Aquaculture,2000,190(3/4):305–324.

Replacement of Fish Meal by Soybean Meal to Supplement Cholesterol and Taurine in Diet for *Litopenaeus Vannamei*: Effects on Growth Performance, Hepatopancreas and Serum Cholesterol Content and Body Composition

LUO Yuan SONG Kai ZHANG Chunxiao* WANG Ling HUANG Fei

(*Key Laboratory of Healthy Mariculture for the East China Sea of Ministry of Agriculture*, *Key Laboratory for Feed Quality Testing and Safety Evaluation*, *Fish College*, *Jimei University*, *Xiamen* 361021, *China*)

Abstract: A growth trial was conducted to investigate the effects of dietary replacement of fish meal with soybean meal to supplement cholesterol and taurine on growth performance, hepatopancreas and serum cholesterol content and body composition of *Litopenaeus vannamei*. Six isoenergetic and isonitrogenous diets were formulated. Among them, one was high fish meal diet (FM) with 30.0% fish meal, and five were low fish meal+high soybean meal diets (SBM1-5) with 12% fish meal. SBM1 was not supplemented with cholesterol or taurine, SBM2 and SBM3 were supplemented with 0.3% and 0.6% cholesterol, respectively, SBM4 was supplemented with 0.3% cholesterol and 0.2% taurine, and SBM5 was supplemented with 0.6% cholesterol and 0.2% taurine. Five hundred and forty juvenile *Litopenaeus vannamei* with the initial average body weight of (0.35±0.01) g were randomly assigned to 6 groups with 3 replicates per group and 30 shrimps per replicate. The experiment lasted for 8 weeks. The results showed that the weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR) and survival rate (SR) of shrimps fed FM, SBM3, SBM4 and SBM5 were significantly higher and feed conversion ratio (FCR) was significantly lower than those of shrimps fed SBM1 (P<0.05). At the same time, shrimps fed FM showed the highest WGR, SGR, SR and the lowest FCR among dietary treatments, but not significantly different from SBM3, SBM4 and SBM5 (P>0.05). Compared with shrimps fed SBM1, the content of total cholesterol in serum and hepatopancreas of shrimps fed SBM3, SBM4 and SBM5 was significantly increased (P<0.05), but there was no significant

---

*Corresponding author, associate professor, E-mail: cxzhang@jmu.edu.cn （责任编辑 菅景颖）

difference between SBM1 and FM (*P*>0.05). Furthermore, compared with shrimp fed SBM1, shrimps fed FM, SBM2, SBM3, SBM4 and SBM5 significantly enhanced low-density lipoprotein cholesterol content in serum (*P*<0.05), and shrimps fed diets SBM3 and SBM5 significantly enhanced high-density lipoprotein cholesterol levels in serum (*P*<0.05). The moisture and ash contents of shrimps fed six diets were not significantly different (*P*<0.05). Compared with shrimps fed SBM1, the contents of crude protein and crude lipid were significantly increased when shrimps fed FM, SBM3 and SBM5 (*P*<0.05), but there was no significant difference when shrimps fed SBM1 and FM (*P*>0.05). These results suggest that 0.6% cholesterol or 0.3% cholesterol and 0.2% taurine supplemented to the low fish mean-high soybean meal diets is helpful for shrimps to improve growth and feed efficiency.

Key words: soybean meal; cholesterol; taurine; growth performance; *litopenaeus vannamei*